

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию Максима Валерьевича ПОЛИКАРПОВА "Алмазные преломляющие линзы для лазероподобных рентгеновских источников", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

Во все времена поступательное развитие различных методов рентгеновской диагностики было неразрывно связано с совершенствованием самих источников рентгеновского излучения (рентгеновские трубки, источники синхротронного излучения (СИ) различных поколений, рентгеновские лазеры на свободных электронах (РЛСЭ)), с развитием элементов рентгеновской оптики (кристаллы-монохроматоры и анализаторы, щелевые системы, интерферометры, изогнутые кристаллы и многослойные структуры, френелевские пластинки, рентгеновские линзы и т.п.), а также с усовершенствованием систем детектирования и визуализации (интегральные и позиционные детекторы, детекторы с энергетическим и временным разрешением).

Особую роль в последние годы занимают работы по разработке рентгеновских линз с различной формой (планарной, со сферическим или параболическим профилем), т.е. фокусирующих и изображающих устройств, основанных на эффекте преломления. Несомненным преимуществом таких линз является то, что они не меняют направления распространения рентгеновского излучения и тем самым упрощают процесс их эксплуатации. До настоящего времени линзы изготавливались на основе таких слабопоглощающих элементов как алюминий, бериллий, кремний и ряд полимерных материалов.

Настоящая диссертация посвящена всестороннему теоретическому и экспериментальному исследованию нового класса преломляющих линз на основе моно- и поликристаллического алмаза. Особую актуальность данные исследования представляют в связи с тем, что при использовании современных источников СИ и РЛСЭ с колоссальной яркостью излучения резко повышаются тепловые и радиационные нагрузки на рентгенооптические элементы. Именно алмаз, который характеризуется низким поглощением, рекордно высокой теплопроводностью (даже по сравнению с металлами), низким коэффициентом расширения и высокой температурной стабильностью является наиболее

подходящим материалом для изготовления рентгеновских линз. Особенно это важно при использовании алмазных преломляющих линз в качестве префокусирующих и пре-коллимирующих рентгенооптических элементов синхротронных источников 3-го и 4-го поколений.

Так как массивный алмаз для данных конкретных целей ранее практически не исследовался (на рубеже 2000 г. были работы по химическому осаждению из газовой фазы поликристаллического алмаза на изогнутую кремниевую подложку, а также использованы методы реактивного ионного травления и электронно-лучевой литографии), то основные цели и задачи диссертации заключались в следующем: 1) Выбор оптимальных поли- и монокристаллических алмазных материалов и технологий их обработки; 2) Изготовление линз с различными параметрами и формой; 3) Исследование и оптимизация влияния лазерной абляции на качество получаемой вогнутой поверхности линз; 4) Исследование на источниках СИ 3-го поколения оптических параметров линз и влияния на них различных искажений профиля их поверхности с использованием широкого набора методов неразрушающего контроля.

Структура диссертации классическая. Она состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 148 страницах, включая 78 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 151 наименование.

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна, практическая значимость, научные положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора, а также приведен список 11-ти печатных работ в реферируемых зарубежных журналах, включенных в перечень ВАК, и 16-ти российских и международных конференций и совещаний, на которых апробировалась работа.

В первой главе, объемом 34 стр., содержится достаточно полный обзор современного состояния исследований в области рентгеновской оптики, включая краткое описание различных источников рентгеновского излучения, отличительные особенности когерентных, интерференционных и фазовых оптических эффектов в рентгеновском диапазоне длин волн. Основное внимание уделено описанию принципов работы преломляющей рентгеновской оптики и

обоснованию целесообразности и перспективности использования алмаза для создания рентгеновских преломляющих линз, способных выдерживать большие тепловые и радиационные нагрузки. Подкупает ясность и простота авторского изложения, подкрепленная большим количеством рисунков и графиков.

Во второй главе, объемом 64 стр., описан процесс лазерной абляции поли- и монокристаллического алмаза импульсами пико- и фемтосекундной длительности для изготовления планарных, одиночных одномерных и одиночных двумерных преломляющих линз с апертурами порядка 1 мм. Основное внимание в этой главе отведено подробному описанию результатов тестирования изготовленных широкоапертурных длиннофокусных алмазных линз несколькими взаимодополняющими неразрушающими методами контроля, такими как: оптическая и сканирующая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия, трехмерная сканирующая лазерная конфокальная микроскопия, рамановская спектроскопия, рентгеновская томография и радиография, высокоразрешающая рентгеновская топография и рентгеновская интерферометрия. Особо следует подчеркнуть, что все линзы затем проверялись как в фокусирующем, так и в изображающем режимах на лабораторных источниках рентгеновского излучения и на высокоинтенсивных источниках СИ третьего поколения. Количество методов контроля поражает и вызывает уважение и восхищение. Эта глава читается с удовольствием. Она изложена по логически правильному принципу “от простого к сложному” и свидетельствует о глубоком понимании автором сути проблем и имеющихся в них многочисленных “подводных камней”.

Наиболее существенные результаты, приведенные во 2-ой главе, можно кратко сформулировать следующим образом: 1) Экспериментально показана возможность метода лазерной абляции для изготовления планарных, одиночных и двумерных алмазных преломляющих рентгеновских линз с апертурами более 1 мм; 2) Абляция лазерами с пикосекундной длительностью импульса позволяет изготавливать линзы со среднеквадратичной высотой шероховатости обрабатываемой поверхности на уровне 1 мкм; 3) Использование лазеров с фемтосекундной длительностью импульса улучшает качество поверхности линзы и уменьшает шероховатость до 0.3 мкм; 4) Проанализированы преимущества и

недостатки моно- и поликристаллического типов алмазного материала. Показано, что поликристаллический алмаз вследствие своей зернистой структуры вносит негативные локальные возмущения в волновой фронт излучения, тогда как использование монокристаллического алмаза позволяет в значительной степени их устранять; 5) Реализована эффективная фокусировка рентгеновского излучения изготовленными алмазными линзами и впервые проведены эксперименты по рентгеновской микроскопии с разрешением 1 мкм.

В третьей главе, объемом 17 стр., описаны результаты проведенных теоретических расчетов и компьютерного моделирования влияния различных искажений профиля линз, возникающих из-за особенностей процесса лазерной абляции, на их оптические свойства. Показано, что наличие поступательных, т.е. плавных отклонений радиуса параболического профиля от заданного при движении пучка лазера от периферии линзы к её центру, и периодических отклонений от идеального профиля, особенно при амплитуде отклонения порядка 0.5% и больше от радиуса кривизны параболы, оказывает существенное негативное влияние на оптические характеристики линз. Однако указанные искажения профилей могут быть практически полностью устранены при применении фемтосекундных лазеров. Весьма похвально, что автор также исследовал возможности пост-обработки поверхности алмазных одномерных полулинз сфокусированным ионным пучком и показал, что этот методом дополнительной обработки позволяет существенно уменьшить шероховатости поверхности линз (от исходного значения примерно 0.7 мкм до величины ~0.1 мкм).

В четвертой главе, объемом 7 стр., приведены и обсуждены результаты экспериментальных исследований по предложенному автором диссертации новому методу подавления высших гармоник рентгеновского излучения после прохождения линзы. Показано, что использование внеосевого падения излучения на линзу приводит к пространственному разделению энергетического спектра излучения, прошедшего через линзу. В результате низкоэнергетическое излучение фокусируется на главной оси линзы, а несфокусированное высокоэнергетическое излучение практически без преломления проходит вперед и не попадает на исследуемый объект. На примере излучения с энергиями 9 и 27 кэВ и составной линзы из девяти бериллиевых линз с радиусом 1 мм

продемонстрировано подавление интенсивности излучения 3-й гармоники в тысячу раз.

В целом диссертация М.В. Поликарпова производит самое благоприятное впечатление. В первую очередь благодаря своей целостности, использованию нескольких методов диагностики оптического качества исследуемых алмазных преломляющих линз, четкостью и продуманностью самих экспериментов, а также экспериментальной проверки работоспособности линз в фокусирующем и изображающем режимах на лабораторных рентгеновских источниках и источниках синхротронного излучения третьего поколения.

По диссертации можно сделать следующие замечания, часть из которых носит характер пожеланий:

1. В автореферате при описании результатов центральной второй главы содержится всего один рисунок – электронно-микроскопические изображения пяти линз. Все остальные результаты представлены лишь текстовым изложением из 13-ти пунктов. Следовало бы дополнить это изложение графическим материалом хотя бы части основных результатов по рентгеновской томографии, решеточной интерферометрии, атомно-силовой микроскопии, лазерной конфокальной микроскопии и т.п., которые обильно представлены в самой диссертации. Аналогичное замечание касается и изложению материалов третьей главы.
2. Материал на стр. 83-84 и на рис. 2.24, посвященный обсуждению возможного выполнения дифракционных условий и перекачки рентгеновского излучения из проходящего сквозь поликристаллический материал линзы направления в отраженное направление носит лишь качественно-визуальный характер, не подкрепленный упомянутому здесь закону Вульфа-Брэгга.
3. Непонятно, почему при обсуждении результатов фокусировки, полученных с использованием трех одиночных линз на стр. 90 и рис. 2.29, 2.32, проводилась аппроксимация распределением Лоренца, тогда как всюду выше и частично ниже неоднократно говорилось о распределении Гаусса.
4. Замечание к формуле (3.11). По мнению оппонента, было бы более правильным представить отклонение реального профиля от идеального в виде

суммы двух смещенных гармонических функций со своими амплитудами и периодами, а не в виде их произведения. Стоило бы также сравнить результаты двумерных расчетов, приведенных на рис. 3.3 и 3.5 и полученных в рамках геометрической (лучевой) оптики, со строгими волновыми расчетами.

Диссертация изложена четко, грамотно и очень аккуратно. Многочисленные тщательно подобранные цветные рисунки и графики хорошо иллюстрируют основные полученные автором результаты. Автор умеет давать простую и наглядную физическую интерпретацию полученным результатам. Все шесть защищаемых положений сформулированы четко и правильно. Формулировка основных результатов в конце каждой главы хорошо помогает восприятию текста. Автореферат дает достаточно полное представление о материале диссертации. Результаты диссертации неоднократно докладывались на представительных совещаниях и конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Считаю, что по объему полученных результатов, их новизне, актуальности, практической и научной значимости представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Максим Валерьевич Поликарпов, вне всякого сомнения заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики.

Профессор кафедры физики твердого тела
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова
доктор физико-математических наук

Владимир Алексеевич Бушуев

119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2,
МГУ, физический факультет
тел. 8(495) 939-12-26, e-mail: vabushuev@yandex.ru
27 марта 2017 г.

Подпись проф. В.А. Бушуева заверяю
декан физического факультета МГУ
профессор



Н.Н. Сысоев